

Isı köprüsü problemlerinde kullanılan matematik modellerin karşılaştırılması

Güler AKGÜN*, Şükran DİLMAÇ

Trakya Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 59860, Çorlu-Tekirdağ

Özet

Bu çalışmada, ara kat ve teras çatı döşemelerinden oluşan ısı köprülerinin modellenmesi için kullanılabilecek basit yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Ara kat döşemelerinin incelenmesinde, uzun kanatçık modeli ile TS 8441'de duvar-kolon birleşimleri için tanımlanan hesap yönteminin döşeme-duvar birleşimlerine uyarlanması denenmiş ve her iki yöntem ile elde edilen sonuçlar, bir başka çalışmada verilen ölçüm sonucu ile ve farklı yalıtım sistemleri için QuickField programından elde edilen hesap sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda aynı yaklaşımların teras çatı döşemeleri için kullanılamayacağı belirlenmiştir. Teras çatı döşemeleri için sınır-değer problemi ve elektrik benzeşim metodu kullanılmıştır. Hesap sonuçlarının ölçüm değerlerinden sapması, en fazla 1°C mertebesinde kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı köprüleri, ara kat, teras çatı, uzun kanatçık modeli, elektrik benzeşim metodu.

Comparison of mathematical models used in thermal bridge problems

Abstract

In this paper, simple approaches being used for the modelling of thermal bridges formed by floors and terrace roofs were evaluated. For floors, two models were examined. The first model is long wing model which is used extensively in the solution of heat transfer problems. The other is adaptation of the method defined in TS 8441 for wall-column interface, to floor-wall interface. The results obtained from each model were compared with the measured values given in literature and with the calculated results obtained using QuickField 5.0 Program. If long wing model is used, the results close to the measured values are obtained when insulation layer on the floor slab is not considered in the calculation. In addition, the results show that the same approaches can not be used for terrace roofs. For this reason, two different approaches were tested for the modelling of thermal bridges formed by reinforced concrete terrace floors. In the first one, thermal bridge was formulated as a boundary layer problem, and the steady-state heat transfer equation was solved for the sample terrace floors with appropriate boundary conditions. In the second approach, electric-analogy simulation systems were used. The calculated and measured values are given in tables for comparison. Maximum difference between the calculated and measured temperatures does not exceed 1°C.

Keywords: Thermal bridges, floors, terrace roofs, long wing model, electric-simulation method.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Güler AKGÜN. akgung@corlu.edu.tr; Tel: (282) 652 94 76 dahili:144.

Makale metni 05.08.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 29.07.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 28.02.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Günümüzde tüm uluslararası standartlarda binaların, ısıtma amaçlı enerji ihtiyaçlarının belirlenmesi için tek boyutlu ısı kaybı hesapları kullanılmaktadır. Halbuki ısı köprülerinde, farklı ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin sınırlı alanda yan yana gelmesi ile önemli miktarda yanal kayıplar meydana gelir ve bu bölgelerde etkin şekilde iki boyutlu ısı iletimi mevcuttur. Günümüzde çok sayıda araştırma, ısı köprülerindeki iki boyutlu ısı akımının, tek boyutlu genel denklemler içine entegre edilmesi üzerinedir (Déque vd., 2001; Kosny ve Christian, 1995; Salgon ve Neveu, 1987; Hassid, 1989; Hassid, 1990). Daha ileri çalışmalar, bu bölgelerde hem iki boyutlu hem de değişken rejim şartları için modellemeler yapmaktadır (Al-Sanea, 2003 ve Mao ve Johannesson, 1997).

Ülkemizdeki durum uluslararası gelişmelerin biraz gerisinde kalmıştır. Binaların ısıtma amaçlı enerji ihtiyacını sınırlandıran ve kullanılacak hesap metodunu açıklayan TS 825’de, ısı köprülerinin dikkate alınması için lineer ısı iletkenliği (U_l) tanımlanmaktadır. U_l değerlerinin hesaplanması için ise, TS 8441’de tanımlanan metodun kullanılması istenmiştir. Fakat, TS 8441 sadece kolon-duvar birleşimleri için U_l değerinin hesap metodunu belirlemektedir; U_l değerinin döşeme-duvar birleşimleri için nasıl hesaplanacağı tanımlı değildir.

TÜBİTAK-İÇTAG (2005) tarafından desteklenen “Döşemelerde Yanal Isı Kayıplarının Hesaplanması İçin Parametrelerin Belirlenmesi” başlıklı proje kapsamında, döşeme-kiriş-duvar birleşimlerinde ısı kaybı ve sıcaklık alanının belirlenmesi ve bu birleşimlerde TS 825’de tanımlanan U_l değeri için gerekli parametreler belirlenmiştir. Bu amaçla öncelikle mevcut hesap yöntemlerinin uygulanabilirliği araştırılmış ve elde edilen sonuçlar bu makalede tartışmaya açılmıştır.

TS 825’de açıklanan hesap metodu oldukça basittir ve bu metod içinde kullanılacak olan döşeme-duvar birleşimlerinin U_l değerinin hesaplanması için önerilecek metodun da basit olması gerekir. Ülkemizde bu konu üzerinde

yayın tespit edilememiştir ve bu çalışmada, ara kat ve teras betonarme döşemelerinden oluşan ısı köprülerinin modellenmesi için basit yaklaşımların kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ara kat döşemelerinde, makine mühendisliğinde çok kullanılan bir model olan, uzun kanatçık modeli ile TS 8441’de duvar-kolon birleşimleri için tanımlanan hesap yönteminin döşeme-duvar birleşimlerine uyarlanması birlikte denenmiştir (TS 8441, 1990; Kakaç, 1998). Teras çatı kirişli betonarme döşemelerinden oluşan ısı köprülerinin modellenmesi için ise, farklı iki yaklaşım denenmiştir. Bunlardan ilki söz konusu ısı köprülerinin sınır-değer problemi haline getirilerek çözülmesidir. Diğer model ise, elektrik benzeşim metodudur. Hesap sonuçları ölçüm sonuçları ile karşılaştırmalı olarak tablo halinde verilmiştir. Hesap sonuçlarının ölçüm değerlerinden sapması genellikle en fazla 1°C mertebesinde kalmıştır.

Döşeme-duvar birleşimlerinde yanal kayıpların TS 825’e uygun şekilde tek boyutlu ısı iletimi denklemlerine dahil edilmesi, geç kalınmış önemli bir eksikliğin giderilmesini sağlayacaktır.

Hesaplamalar

Yukarıda da açıklandığı üzere, incelenen yaklaşımlar ara kat kirişli döşemeleri için kanatçık modeli ve TS 8441’de açıklanan metodun uyarlaması ile, teras katı kirişli döşemeleri için sınır-değer probleminin uygulaması ve elektrik benzeşim metodunun kullanılmasıdır. Aşağıda hesaplarla ilgili geniş açıklamalar ve hesap sonuçlarının değerlendirilmesi verilmiştir.

Ara kat kirişli döşemelerinin ısı köprüsü olarak çözümü

Ara kat kirişli döşemelerinde meydana gelen sıcaklık alanının belirlenmesi için ilk olarak, makine mühendisliğinde kanatçıklı cisimler için kullanılan ısı iletimi probleminin bir boyutlu diferansiyel denklemi çıkarılmış ve diferansiyel denklemin çözümü için x -yönünde iki sınır koşulu alınarak denklem çözülmüştür. Bu problemde ara kat döşemesi uzun kanatçık olarak düşünülmüş ve $x \rightarrow \infty$ olduğunda, kanatçığın sıcaklığı, fiziki olarak akışkan sıcaklığına eşit

olacağından, sınır koşulları kanatçık tabanında ve kanatçık ucunda yazılmıştır. İkinci olarak da, ara kat döşemesinin ısı köprüsü olarak çözümü TS 8441'de yer alan Tablo 1'deki kesitler, saat yönünün ters istikâmetinde 90° döndürülerek ara kat döşemesi olarak ele alınmış ve tablodaki formül ve katsayılar kullanılarak iç yüzey sıcaklıkları hesaplanmıştır.

Ara kat döşemesinin kanatçık modeli ile çözümü

Değişken kesitli bir kanatçıkta, ısı üretiminin olmadığı bir durumda ve λ ısı iletimi katsayısının sabit olması halinde ısı iletimi denkleminin aşağıdaki gibi alındığı bilinmektedir (Kakaç, 1998):

$$\frac{d}{dx}(\lambda A \frac{dT}{dx}) - \alpha P(T - T_{\infty}) = 0 \quad (1)$$

Burada, T yerel sıcaklık, A değişken kesit alanı, P kanatçık çevresi, T_{∞} akışkanın sabit sıcaklığı, λ ısı iletim katsayısı ve α iç yüzey film katsayısıdır. α , TS 825-Şekil 5 ve Çizelge 6'ya uygun olarak ara kat döşemesinin altında ve üstünde eşit olarak alınmıştır.

Kanatçık probleminde $\theta = T - T_{\infty}$ tanımı yapılmaktadır; ancak ara kat döşemesi için $\theta = T_{\infty} - T$ tanımının kullanılması daha uygundur ve bu durum denklemlerde bir değişiklik oluşturmamaktadır. Sonuç olarak (1) denkleminin son hali (2) denklemindeki gibi olmaktadır:

$$\lambda A \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{dA}{dx} \times \frac{d\theta}{dx} - \alpha P\theta = 0 \quad (2)$$

Kanatçık kesitinin sabit olması durumunda (2) diferansiyel denklemi;

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (3)$$

durumuna indirgenir. Burada $m = \sqrt{\frac{\alpha \times P}{\lambda \times A}}$ olup kanatçık denkleminin genel çözümü:

$$\theta(x) = A \times e^{mx} + B \times e^{-mx} \quad (4)$$

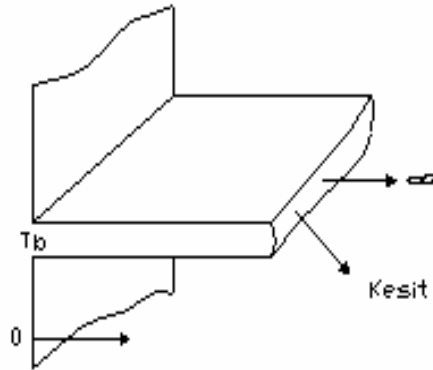
şeklinde bulunabilir. (3) nolu diferansiyel denklemin çözümü için x -yönünde iki sınır koşulunun verilmesi uygun olur. Bu sınır koşulları kanatçık tabanında ve ucunda verilmelidir. Uzun kanatçık durumunda Şekil 1'de görünen kanatçık sistemine göre $x \rightarrow \infty$ olduğu zaman sınır koşullarının aşağıdaki gibi alınması uygun olmaktadır:

$$\begin{array}{ll} x = 0 & \text{da} \quad T = T_b \quad \text{veya} \quad \theta = \theta_b \\ x \rightarrow \infty & \text{için} \quad T = T_{\infty} \quad \text{veya} \quad \theta \rightarrow 0 \end{array}$$

Burada b indisi kanatçık tabanını göstermektedir. Sınır koşullarının kullanılması durumunda $A=0$ ve $B = \theta_b$ sonuçları bulunur. Bu durumda (3) denkleminin çözümü

$$\theta(x) = \theta_b \cdot e^{-mx} \quad (5)$$

haline gelir.



Şekil 1. Üniorm kesitli kanatçık (Kakaç, 1998).

Bilindiği üzere bu problemin analizinde aşağıdaki varsayımlar yapılmaktadır (Kakaç, 1998):

- ısı iletimi kararlı rejim halindedir,
- kanatçık malzemesi homojen ve izotropiktir,
- λ , ısı iletim katsayısı üniorm ve sabittir,
- α , film katsayısı sabit olup, konveksiyonla ısı iletimini temsil etmektedir,
- kanatçık etrafında akışkan sıcaklığı sabit ve üniormdur,
- kanatçık taban sıcaklığı sabit ve üniormdur,

-kanatçık kalınlığı uzunluğuna nazaran ufak olduğundan, kalınlıkta sıcaklık basamağı sıfırdır.

Kanatçıktan akışkana konveksiyonla transfer edilen ısı miktarı, tabandan sağlanan ısı kazancı ile temin edilmektedir. Ara kat döşemesinde ise, akışkandan (ortam havasından) döşemeye konveksiyonla transfer edilen ısı, yine tabandan dış duvara iletilmektedir. O halde:

$$Q = -\lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)_0 = -\lambda A \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_0 \quad (6)$$

yazılabilir. (5) ve (6) nolu denklemler birlikte düşünüldüğünde, aşağıdaki (7) ve (8) nolu denklemler elde edilir:

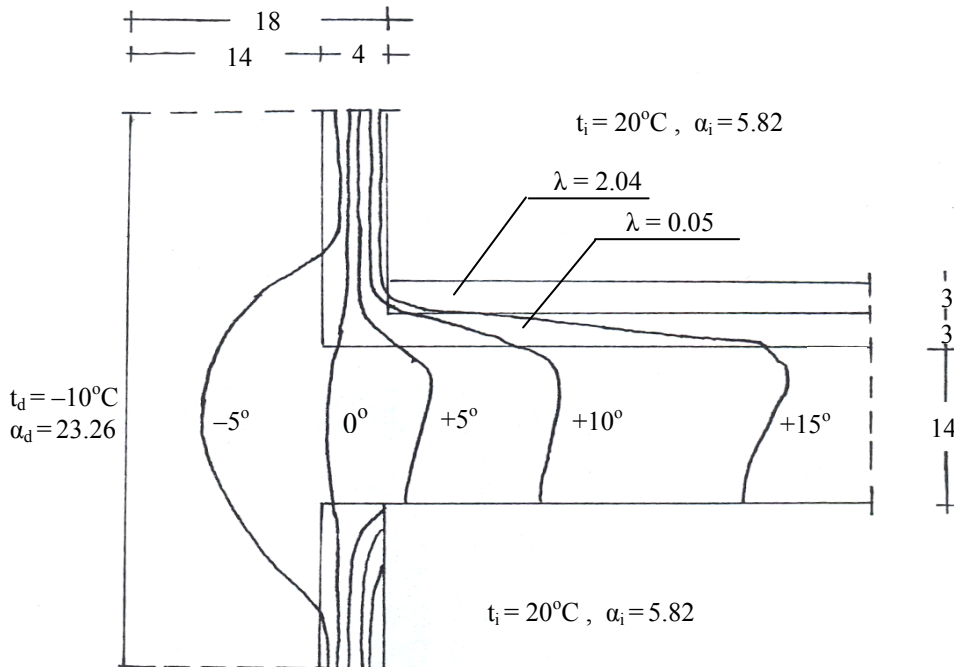
$$\left(\frac{d\theta}{dx} \right)_0 = -\theta_b \sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda A}} \quad (7)$$

$$Q = \theta_b \sqrt{\alpha P \lambda A} = (T_\infty - T_b) \sqrt{\alpha P \lambda A} \quad (8)$$

$$q = \frac{Q}{A} = (T_\infty - T_b) \sqrt{\frac{\alpha P \lambda}{A}}$$

Yukarıda da belirtildiği üzere, ara kat döşemesi için kanatçık problemi ile ilgili olarak yukarıda belirtilen varsayımlar ve açıklamalar yine geçerlidir. Ancak iletimin yönü ters istikâmettedir. Döşemenin (kanatçığın) alt ve üst tarafındaki iç ortam havasından (akışkandan) döşemeye konveksiyonla ısı iletimi gerçekleşecek, döşeme boyunca kondüksiyonla iletilen bu enerji, yine kondüksiyonla dış duvara (betonarme kiriş ve döşeme alnına) iletilecek ve ara kat döşemesinden kaynaklanan ısı kaybını belirleyecektir. Bu bilgiler ışığında, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi öğretim üyelerinden Doç Dr. Lemi Yücesoy (1990)'un basılmamış eserinden alınmış olan ve ölçüm değerlerinin bulunduğu bir ara kat döşemesi örneği (Şekil 2) için hesaplamalar yapılmıştır. Hesap ve ölçüm sonuçlarının tutarlı olması, ara kat döşemelerinden kaynaklanan ısı köprülerinde ısı iletiminin tek boyutlu olarak değerlendirilmesinin mümkün olabileceğini göstermektedir.

Ülkemiz şartlarında alınmış ölçüm değerleri olmadığı için, tercüme olan Lemi Yücesoy (1990)'un yayınlanmamış eserinden faydalanılmıştır. Ancak görüldüğü üzere bu kesitte, ara kat döşemesi olmasına rağmen döşeme üzerinde yalıtım vardır.



Şekil 2. Ara kat döşeme örneği-Yücesoy (1990)

Dolayısıyla λ ısı iletkenliği kesit içinde homojen olmamaktadır. Şekil 2'deki örnekle ilgili hesaplamalarda, döşemenin λ değeri önce 2.04 W/mK alınmış; daha sonra döşeme ve yalıtımın kalınlık ortalamaları dikkate alınarak ortalama ısı iletkenliği aşağıdaki şekilde hesaplanmış ve bu değere göre tekrarlanmıştır. Şekil 2'de görülen kesitte okunan ölçüm değerleri ile hesap sonuçlarından elde edilen değerler Tablo 1'de verilmiştir.

$$\lambda_{ort} = \left(\frac{0.03}{0.17} \times 0.05\right) + \left(\frac{0.14}{0.17} \times 2.04\right) = 1.69 \text{ W/mK}$$

Örnek üzerinde;

$$T_b = 4^\circ\text{C} ; T_\infty - T(x) = \theta(x)$$

$$T_\infty = 20^\circ\text{C} ; T_\infty - T_b = \theta_b = 16^\circ\text{C} \quad \text{dir.}$$

$$m = \sqrt{\frac{5.82 \times 2(1 + 0.14)}{2.04 \times 1 \times 0.14}} = 6.82$$

$$\theta(x) = 16 \times e^{-6.82x} \text{ olmaktadır.}$$

$$\lambda = 1.69 \text{ W/mK için ise, } m=7.4 \text{ ve}$$

$$\theta(x) = 16 \times e^{-7.49x} \text{ olmaktadır.}$$

Tablo 1'den görüldüğü üzere ara kat döşemesinin üstünde yalıtım olsa bile, önerilen hesap metodunda sadece betonarme döşemenin ısı iletkenliğinin dikkate alınması ile ölçüm değerlerine daha yakın sonuçlar elde edilmektedir. Özellikle dış duvara yakın bölgelerde daha uygun sonuçlar vermektedir. Dış duvardan uzaklaştıkça sapma biraz daha artmaktadır.

Ülkemizdeki uygulamalarda ara kat döşemelerinde yalıtım katmanı kullanılmaz, dolayısıyla yapılan kabullere daha uygun bir kesit söz konusudur. Ülkemizdeki uygulamalara göre belirlenen ara kat kirişli betonarme döşemeleri üzerinde QuickField programından elde edilen hesap sonuçları ile önerilen yaklaşımın sonuçları karşılaştırılmıştır. İncelenen kesitler Şekil 3'de görülmektedir.

Tablo 1. Ara kat döşemelerindeki ısı iletimi probleminin kanatçık problemi olarak modellenmesi halinde elde edilen hesap sonuçları ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

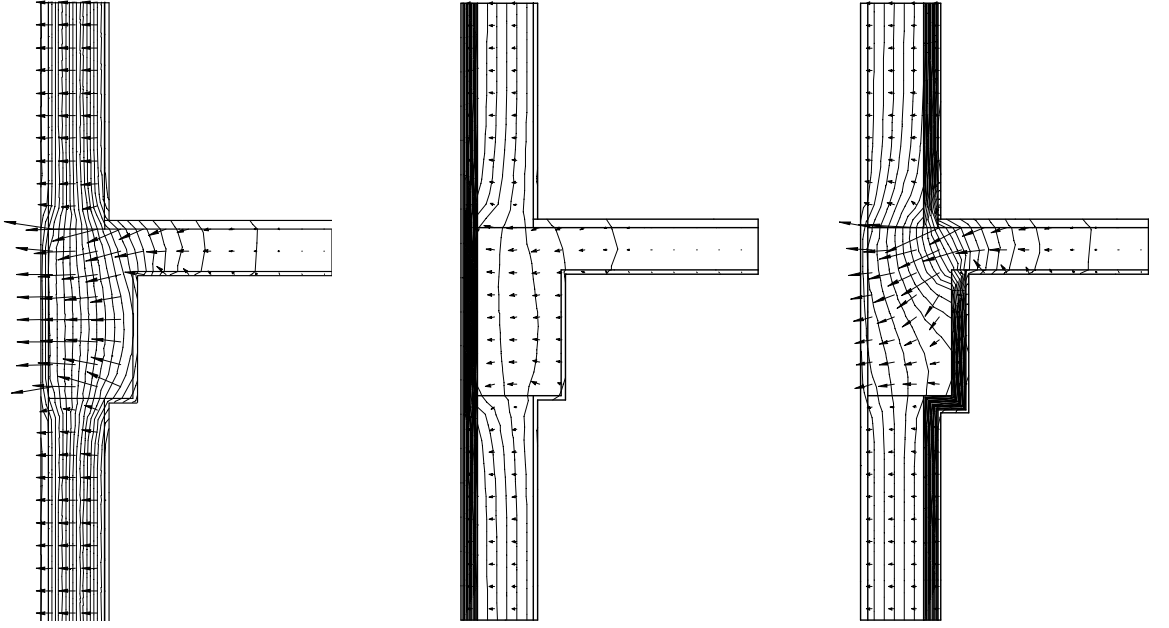
Mesafe (m)	Örnekten okunan sıcaklık değerleri (°C)	$\lambda=2.04\text{W/mK}$ için kanatçık modeli ile hesaplanan sıcaklıklar (°C)	$\lambda=1.69\text{W/K}$ için kanatçık modeli ile hesaplanan sıcaklıklar (°C)
-0.035	0	-0.30	-0.80
0.012	+5	+5.25	+5.38
0.097	+10	+11.74	+12.26
0.248	+15	+17.05	+17.5

Ülkemizde uygulanan kesitler ve yalıtım sistemleri üzerinde yapılan değerlendirme sonuçları Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'de gösterilmiştir. Bu tablolardan görüldüğü gibi, kanatçık modelinin uygulanması ile elde edilen sıcaklıklar, QuickField programında sonlu farklar metodu kullanılarak elde edilen sıcaklıklara çok yakındır.

Tablo 2. Yalıtımsız ara kat için QuickField 5.0 programından elde edilen sıcaklık değerleri ile uzun kanatçık modeli kullanılarak hesaplanan sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Mesafe (m)	QuickField kullanılarak okunan sıcaklıklar (°C)	Kanatçık modeli ile hesaplanan sıcaklıklar (°C)	Fark (°C)
0.10	16.45	17.64	-1.19
0.24	18.58	18.62	-0.04
0.45	19.61	19.38	+0.23
0.66	19.88	19.72	+0.16
0.80	19.91	19.84	+0.07

Dışarıdan yalıtım uygulamasında tüm kesitte tek boyutlu ısı iletimi hakim olduğundan, en yakın sıcaklık değerleri bu durumda elde edilmiştir. Yalıtımsız durumda ve içerden yalıtımlı durumda özellikle döşeme-duvar birleşim noktalarında meydana gelen iki boyutlu ısı iletimi sebebiyle, kanatçık modelinin uyarlaması ile elde edilen sonuçlarda sapma biraz daha büyüktür. Döşemelerle ilgili diğer bir konu da, sabit rejim ısı iletim hesaplarında kullanılan U-değerinin hesaplanması sırasında, meydana gelen ısı kaybını



a) Yalıtımsız

b) Dışarıdan yalıtım

c) İçeriden yalıtım

Şekil 3. İncelenen kesitlerde sıcaklık ve ısı akısının dağılımı

doğru olarak ifade edebilmek için, döşeme kalınlığının ne alınması gerektiğidir. Döşeme iç ortama doğru devam eden sürekli bir eleman olduğu için tanımlı bir kalınlığı yoktur. Kalınlığın izafi olarak belirlenmesi gerekir. Bu amaçla U değeri iki yoldan hesaplanmıştır.

Birincisinde (9) denklemi kullanılmış, diğerinde ise (8) denklemden faydalanılmıştır. U değeri TS 825’de yapı elemanının ısı geçirgenlik katsayısı olarak isimlendirilmektedir ve d kalınlığında çok tabakalı bir elemanın ayırdığı ortamlar arasındaki sıcaklık farkı 1°C olduğu zaman kararlı rejim şartlarında yüzeye dik doğrultuda birim zamanda birim alandan iletilen ısı enerjisi miktarıdır.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_d}} \quad (9)$$

Şekil 2’deki kesit için duvar kalınlığı (0.14 m) seçilmiştir. (8) nolu denklem ise kanatçık modeline göre gerçekleşen ısı kaybını vermektedir ve iç ortamdan döşeme boyunca iletilen tüm ısı enerjisini dikkate almaktadır. Bu büyüklükten hareketle “q” değerinin hesaplanması mümkündür.

Tablo 3. Dışarıdan yalıtım olması durumunda QuickField 5.0 programından elde edilen sıcaklık değerleri ile uzun kanatçık modeli kullanılarak hesaplanan sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Mesafe (m)	QuickField kullanılarak okunan sıcaklıklar ($^{\circ}\text{C}$)	Kanatçık modeli ile hesaplanan sıcaklıklar ($^{\circ}\text{C}$)	Fark ($^{\circ}\text{C}$)
0.10	19.19	19.46	-0.27
0.24	19.67	19.68	-0.01
0.45	19.91	19.86	+0.05
0.66	19.97	19.94	+0.03
0.80	19.98	19.94	+0.04

Tablo 4. İçeriden yalıtım olması durumunda QuickField 5.0 programından elde edilen sıcaklık değerleri ile uzun kanatçık modeli kullanılarak hesaplanan sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Mesafe (m)	QuickField kullanılarak okunan sıcaklıklar ($^{\circ}\text{C}$)	Kanatçık modeli ile hesaplanan sıcaklıklar ($^{\circ}\text{C}$)	Fark ($^{\circ}\text{C}$)
0.15	16.53	18.12	-1.59
0.28	18.47	18.86	-0.39
0.41	19.31	19.31	0.00
0.67	19.83	19.74	+0.09
0.80	19.87	19.84	+0.03

(9) nolu denklem tek boyutlu ve kararlı ısı akısı için U-değerinin hesaplanmasıdır. Bu formül kullanıldığında döşeme izafi kalınlığı olarak “q” ile U değeri arasındaki bağıntı ise (10) nolu denklemde görülmektedir. Şekil 2’deki büyük- lükler yerine konarak (8) ve (10) nolu denklemlerden de U değeri hesaplanabilir.

$$q = U \times \Delta T = U \times (T_i - T_d) \quad (10)$$

Burada q ısı akısı (=Q/A), T_i iç ortam sıcaklığı, T_d dış ortam sıcaklığı olarak tarif edilmiştir. (9) nolu denklem ile hesaplanan U değeri, 3.53 W/m²K, (8) ve (10) nolu denklemler yardımı ile hesaplanan U değeri, 7.42 W/m²K olarak bulunmaktadır. Döşemenin U değerinin hesabında, döşeme kalınlığı olarak duvar kalınlığının seçilmesi halinde U-değeri, düşük çıkmaktadır. Halbuki iç ortamdan dış ortama doğru döşeme boyunca gerçekleşen ısı kaybının da dikkate alınması halinde, yani kanatçık problemine benzeterek bulunan eşdeğer U-değeri 7.42 W/m²K olmaktadır. Bu da yüksek bir değerdir. Sebebi, kanatçık problemi uygulamasında, Şekil 2’de görülen döşeme üstündeki yalıtımın etkisinin dikkate alınamayışıdır. Bu sebeple gerçek değerden daha büyük ısı kaybı hesaplanmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere, ülkemizde ara kat döşemelerinde yalıtım kullanılmamaktadır. Şekil 3’te görülen ve döşemede yalıtım olmayan durumlar için kanatçık problemi yaklaşımı uygulandığında, U değerlerinin çok daha anlamlı çıktığı Tablo 5’de görülmektedir.

Kanatçık yaklaşımını kullandığımız zaman, döşeme boyunca gerçekleşen ısı çekişi de dikkate alındığından; U-değerleri yükselmekte ve her durum için farklı değerler almaktadır. En düşük U değeri yine dışarıdan yalıtımlı durum içindir.

Daha sonra içerden yalıtımlı durum gelmekte ve en yüksek U değeri de yalıtımsız durum için hesaplanmaktadır. İçerden yalıtım için yüksek U-değerinin hesaplanmasının sebebi, Şekil 3’de görülen ısı akısı dağılımında, döşeme duvar birleşim noktalarında yalıtım olmadığı için meydana gelen yüksek değerdeki iki boyutlu ısı iletimidir. Tablo 5’in son kolonunda, döşemeden iç ortama çekilen ısı akısı da dikkate alındığında; (9) nolu denklem kullanılarak yapılacak U-değeri hesaplarında döşeme kalınlığının alınması gereken değerleri görülmektedir. Dışarıdan yalıtımlı durumda bu kalınlığın sıfır çıktığı, yani döşemeden kaynaklanan bir direnç ilave edilmesinin uygun olmadığı anlaşılmaktadır.

Ara kat döşemelerinin TS 8441’deki model ile çözümü

“TS 8441 Isı Yalıtım Hesaplama Metodları – Düzlem Yapı Yüzeylerinde Dikdörtgen Kesitli Isı Köprüleri” isimli standartta, duvar kolon birleşimleri için verilen denklemlerin ara kat döşemelerindeki döşeme-duvar birleşimleri için de kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, TS 8441’de sayfa 7, Tablo 1’de verilen dikdörtgen kesitler, saat yönüne ters yönde 90° döndürülerek ara kat döşemesi olarak ele alınmış ve Şekil 2’de verilen ara kat örneği ve Şekil 3’de görülen ara kat kesitleri, TS 8441’de verilen Tabloda ilgili satırlar için tanımlanan hesaplama metotları kullanılarak (yalıtımsız durum için a satırı, dışardan sürekli yalıtım için c satırı ve içerden kesikli yalıtım için e satırı) çözülmüştür. Sonuçlar Tablo 7’de görülmektedir. Standartta göre kullanılan büyüklüklerin bu çalışma kapsamında alınan değerleri Tablo 6’da, hesaplamalarda kullanılan formüller ise aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 5. Şekil 3’deki kesitlerin U değerlerinin karşılaştırılması

Kesitin özelliği	(9) nolu denkleme göre hesaplanan U değerleri*, (W/m ² K)	(8) ve (10) nolu denklemlere göre hesaplanan U değerleri, (W/m ² K)	(9) nolu denkleme kullanılan döşeme kalınlığı (m)	(9) nolu denkleme alınması önerilen kalınlık (faydalı kalınlık) (m)
Yalıtımsız	2.93	4.66	0.30	0.033
Dışarıdan yalıtım	0.64	0.89	0.30	0.000
İçeriden yalıtım	2.93	4.55	0.30	0.044

*Döşeme izafi kalınlığı = giriş kalınlığı, (9) nolu denklemde U değerinin hesabı için dış taraftaki katmanlar da dikkate alınmıştır.

Tablo 6. İncelenen kesitlere ait hesaplarda kullanılan değerler

	b	d	d _{yal}	d _{duvar}	d _{ısıva}	d _{dsıva}	λ _{duvar}	λ _{TB}	λ _{yal}	λ _{ısıva}	λ _{dsıva}
Şekil 2	0.14	0.18	0.04	0.14	-	-	2.04	2.04	0.05	-	-
Şekil 3 yalıtımsız	0.15	0.24	0.05	0.2	0.015	0.025	0.45	2.1	0.04	0.87	0.87
Şekil 3 içeriden yalıtımlı	0.15	0.285	0.05	0.2	0.010	0.025	0.45	2.1	0.04	0.7	0.87
Şekil 3 dışarıdan yalıtımlı	0.15	0.273	0.05	0.2	0.015	0.008	0.45	2.1	0.04	0.87	0.8

Tablo 7. Döşemede farklı L uzunlukları (≡döşeme kalınlıkları) için en düşük iç yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

	En düşük iç yüzey sıcaklığı			Ölçülen/ QuickField 5.0
	Farklı L değerleri için TS 8441'e göre hesaplanan			
	L=d, m	L=d+0.1, m	L=d+0.2, m	
Şekil 2'deki kesit ve iklim şartları	0.33	3.21	5.39	3.52
Şekil 3'deki kesit-yalıtımsız (1.DG)	15.1	15.8	16.3	16.0
Şekil 3'deki kesit-içeriden yalıtımlı (1.DG)	14.4	16.6	16.9	13.0
Şekil 3'deki kesit-dışardan yalıtımlı(1.DG)	9.9	11.4	12.5	19.0

$$v_{TB} = v_i - \zeta \times (v_i - v_e) \quad (11)$$

$$\zeta = R_i [U_0 + \eta \times (U_{TB} - U_0)] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \eta &= 1 + 0.1 \times Z_1 \times Z_2 \quad (\text{a satırı}); \\ \eta &= 1 + 2.4 [Z_1 + Z_1^{-1}]^{-1} \quad (\text{c satırı}) \\ \eta &= 1 + 0.1 Z_1 Z_2 \quad (\text{e satırı}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$Z_1 = \frac{(d' - b) \times d}{d' \times b} \times \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_{TB}} \right)^{0.5} \quad (14)$$

$$Z_2 = \left[\frac{(d' - b) \times d}{d' \times b} \right]^{-0.75} \times \left(\frac{d}{d_{yal}} \right)^{0.5} \quad (15)$$

d' = 1 m, b ısı köprüsü genişliği, d duvar toplam kalınlığı, d_{yal} yalıtım kalınlığı, λ_c duvarın ısı iletkenliği, λ_{TB} ısı köprüsünün ısı iletkenliği, v_i

iç ortam sıcaklığı (20°C), v_e dış ortam sıcaklığı, v_{TB} ısı köprüsünden kaynaklanan en düşük iç yüzey sıcaklığı, R_i iç yüzey direnci, R_e dış yüzey direncidir. U₀ ve U_{TB} ise sırasıyla duvarın ve ısı köprüsünün ısı geçirgenliğidir. U_{TB}, farklı döşeme uzunlukları(L) için farklı değerler alacaktır. Z₁, Z₂, ζ ve η ise (12), (13), (14) ve (15) nolu formüllerle hesaplanan katsayılarıdır. En düşük iç yüzey sıcaklığı (11) ve (12) nolu formüller kullanılarak hesaplanmaktadır.

Yukarıdaki bilgiler kullanılarak Şekil 2 ve Şekil 3'de görülen kesitler için hesaplanan en düşük iç yüzey sıcaklıkları Tablo 7'de gösterilmiştir. Şekil 3'de görülen kırıllı döşemelerin üst kodunda tuğla duvar, alt tarafında önce kırıllı sonra tuğla duvar bulunmaktadır. U₀'ın hesaplanmasında tuğla ve kırıllı U değerlerinin alansal ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, ara kat döşemeleri için yalıtımsız durumda (Şekil 3) ve duvarların da betonarme

olması halinde (Şekil 2) döşeme-duvar birleşimleri için TS 8441’de verilen formüllerin, kesitlerin 90° döndürülmesi suretiyle kullanılabilmesi mümkün görülmektedir. İçerden yalıtım uygulamasında bir fark vardır, ancak bu farkı kapatacak değişiklik önerilerinin geliştirilmesi mümkün olabilir. Fakat dışardan yalıtım uygulaması için, bu yaklaşım tamamen yanlış değerler vermektedir.

Teras döşemelerinin ısı köprüsü olarak çözümü

Teras döşemelerinde belirgin şekilde iki boyutlu ısı akımı olduğundan, meydana gelen ısı kayıpları için yukarıda açıklanan iki yöntemin kullanılması mümkün değildir ve bu kesitler için farklı çözümler önerilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, iki farklı yaklaşımın sonuçları değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki çatı katı döşemelerinde oluşan ısı köprülerinin sınır-değer problemi haline getirilerek çözülmesidir. Diğeri ise elektrik benzeşim metodunun kullanılmasıdır.

Teras döşemesinin sınır-değer problemi olarak çözümü

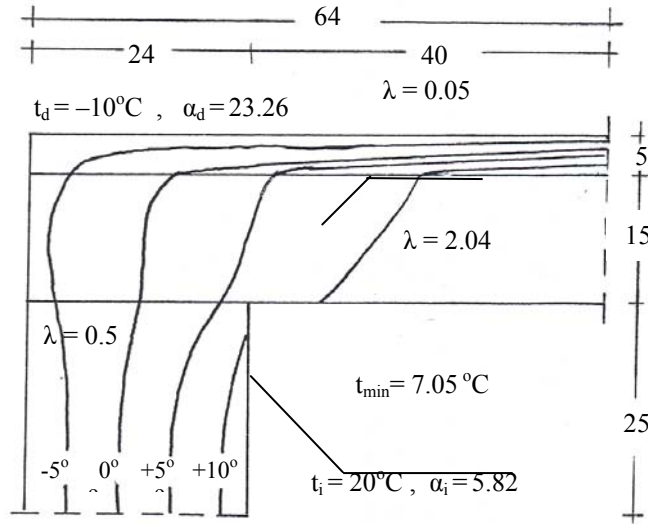
Herhangi bir fiziksel durumun göz önüne alınmasıyla ortaya çıkan bir kısmi diferansiyel denklem, adi diferansiyel denklemlere benzer şekilde, belirli başlangıç veya sınır koşullarına bağlı olarak çözülür. Bu çalışma kapsamında, çatı katı döşemelerinde oluşan ısı kayıplarının hesaplanması için iki boyutlu ısı iletimi denklemi kullanılmıştır. Problem x-y düzleminde düşünüldüğünde, ısı üretiminin de bulunmaması halinde ısı iletiminin diferansiyel denklemi (16) nolu denklemle verilmektedir (Kakaç, 1998). Isı iletimi denklemini çözmek için çeşitli analitik yöntemler mevcuttur.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (16)$$

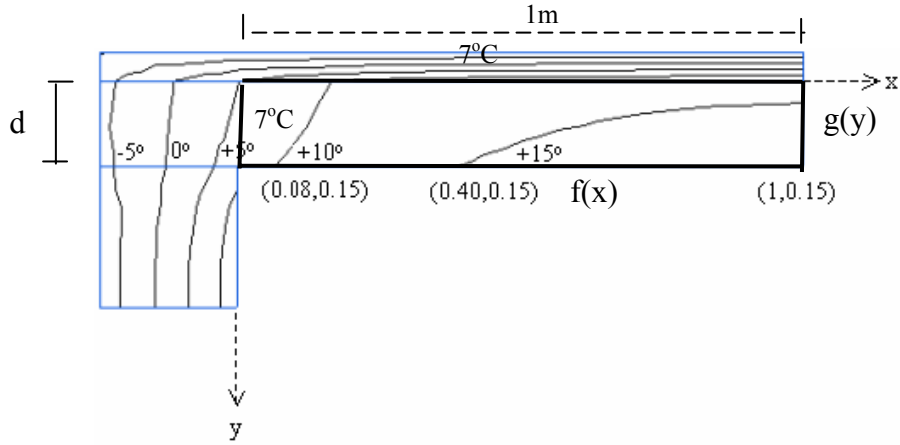
Değişkenlerin ayrılması yöntemi bunlardan biridir. Sürekli rejimde iki boyutlu ısı iletimi problemine değişkenlerin ayrılması yönteminin uygulanabilmesi için bazı şartlar mevcut olup en önemlisi, bu problem için sınır koşullarından üç adedinin homojen olması, bir adedinin homojen

olmaması şartıdır. Bu bilgiler ışığında, ara kat örneğinde olduğu gibi İTÜ Mimarlık Fakültesi öğretim üyelerinden Lemi Yücesoy (1990)’un basılmamış çalışmasından alınmış olan teras çatı örneği sınır-değer problemi haline getirilip çözülmüştür. Şekil 4’de görüldüğü üzere, beton döşemesi üzerinde 5 cm kalınlığında yalıtım yer almaktadır. Isı köprüsü beton döşemede oluşacağından kabaca sınır-değer problemi için koordinatların Şekil 5’deki gibi alınması uygun olacaktır. Şekil 4’e bakıldığında, yalıtımın hemen altında bir noktadan sonra sıcaklığın sabit ve 7°C civarında olduğu görülmektedir. Yine şekilden okunduğu üzere döşeme-duvar birleşiminde 7°C olan sıcaklığın, bu noktadan yalıtıma kadar yaklaşık 7°C olarak alınması mümkündür. Döşemenin iç yüzeyinde ise, $T_{min}=7^\circ\text{C}$ olan sıcaklığın içeriye doğru gidildikçe x eksenine ile değiştiği görülmektedir, dolayısıyla bu çizgi için bir fonksiyon tanımlanmalıdır ($T(x,0.15) = f(x)$). Döşeme boyunca içeri doğru 1m gidilip, hayali bir kesit alındığı düşünülürse; sıcaklığın y eksenine ile değişeceği görülmektedir ve başka bir fonksiyon tanımlanması gerekmektedir ($T(1,y) = g(y)$). Döşeme uzunluğunun 1m alınması, sınır-değer problemine sınır koşullarını da sağlayan bir çözüm fonksiyonu aranması ile ilgilidir. Şekil 4 ile verilen teras kat örneği için QuickField programı kullanılarak izoterm eğrilerini veren şekil elde edilmiştir (Şekil 5). Şekil 5’de görülen izoterm eğrileri, Şekil 4’de ölçüm sonuçlarına dayanılarak verilen izoterm eğrileri ile aynıdır. Şekil 5 ayrıca döşeme diliminin 1 metreye kadar uzanan kısmında izoterm eğrilerinin nerede bulunduğunu da vermektedir.

Probleme bakıldığında, sınır koşullarının homojen olmadığı görülmektedir. Sınır koşullarını homojen yapmak da mümkün olmadığı için, bu problemin değişkenlere ayrılma yöntemi ile çözülmesi mümkün değildir. Burada $T(x,y)$ fonksiyonu, bilinmeyen iki farklı fonksiyonun toplamı olarak düşünülebilir. Sınır koşulları da öylesine ayarlanabilir ki, problemlerin birinde homojen sınır koşulları oluşabilsin. Bu şekilde analiz edilerek iki ayrı sınır-değer problemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur (Tyn Myint-U, 1980).



Şekil 4. Teras kat örneği (Yücesoy, 1990)



Şekil 5. Teras kat örneği için (Şekil 4'deki) QuickField programından elde edilen izoterm eğrileri ve incelenen sistemin sınır-değer probleminin çözümünde kullanılacak basitleştirilmiş gösterimi

$$T(x, y) = V(x, y) + U(x, y) \quad (17) \quad \text{Problem 1'in çözümünden}$$

Problem 1:

$$U_{xx} = 0, U(0, y) = 7^\circ, U(1, y) = g(y) \quad (18)$$

$$U(x, y) = [g(y) - 7]x + 7 \quad (24)$$

olarak bulunur.

Problem 2:

$$V_{xx} + V_{yy} = -U_{yy} = H(x, y) \quad (19)$$

$$V(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(y) \cdot \sin n\pi x \quad (25)$$

$$v(x, 0) = 7 - U(x, 0) = F(x) \quad (20)$$

$$v(x, d) = f(x) - U(x, d) = G(x) \quad (21)$$

$$H(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} h_n(y) \cdot \sin n\pi x \quad (26)$$

$$v(0, y) = 0 \quad (22)$$

$$v(1, y) = 0 \quad (23)$$

Problem 2'deki $v(x, y)$ fonksiyonunu çözebil-
mek için, çözümün aynı zamanda sınır koşul-
larını da sağlayan bir çözüm olması gerektiği

göz önünde bulundurularak (25) ve (26) nolu denklemlerde gösterilen varsayımlar yapılmıştır.

Dolayısıyla,

$$h_n(y) = \frac{2}{1} \int_0^1 H(x, y) \cdot \sin n \pi x \, dx \quad (27)$$

olmalıdır. Buradan Problem 2'nin çözümü (28)'deki gibi:

$$v(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \cosh \lambda_n y + b_n \cdot \sinh \lambda_n y + \frac{1}{\lambda_n} \int_0^y h_n(\tau) \cdot \sinh[\lambda_n (y - \tau)] \cdot d\tau \right] \sin n \pi x \quad (28)$$

elde edilir. Sınır koşullarının kullanılması sonucu a_n ve b_n katsayıları aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$a_n = \frac{2}{1} \int_0^1 F(x) \cdot \sin n \pi x \, dx \quad (29)$$

$$= 2 \int_0^1 [7 - g(0)] \cdot x \cdot \sin n \pi x \, dx$$

$$b_n = \frac{2}{\sinh \lambda_n d} \int_0^1 \left[f(x) - 7 + [7 - g(d)] \cdot x - \sum_{n=1}^{\infty} (A_n + B_n) \cdot \sin n \pi x \right] \cdot \sin n \pi x \cdot dx \quad (30)$$

(30)'da yer alan A_n ve B_n katsayıları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$A_n = a_n \cdot \cosh \lambda_n d \quad (31)$$

$$B_n = \frac{1}{\lambda_n} \int_0^d h_n(\tau) \cdot \sinh[\lambda_n (d - \tau)] \cdot d\tau \quad (32)$$

Böylece Problem 2'nin de çözümü elde edilmiş olur. $T(x, y)$ sıcaklığının bulunabilmesi için ise (24) ve (28)'in (17) denkleminde yerine yazılması yeterlidir. Şekil 4'teki örneğimizde $d=0.15$ olarak görülmektedir. $f(x)$ ve $g(y)$ fonksiyonlarının açık yapısı Şekil 5'ten faydalanılarak, $f(x)=-22.285x^2+28.559x+7.369$ ve $g(y)=82.143y+7$ şeklinde bulunmuştur. Şekil 4'teki teras kat örneği için, belirlenen $f(x)$ ve $g(y)$ fonksiyonları kullanılarak, çeşitli x ve y noktalarında $T(x, y)$

sıcaklıkları hesaplanmış ve bu sonuçlar Tablo 8'de karşılaştırmalı olarak belirtilmiştir. Bu sonuçlar göstermektedir ki, teras katı döşemelerinin yukarıda belirtilen şekilde sınır-değer problemi olarak çözülmesi uygundur ve en büyük fark -1.5°C olmaktadır.

Tablo 8. Quick Field 5.0 programından elde edilen sonuçlar ile Sınır-değer probleminden elde edilen sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Mesafe (m)	QuickField kullanılarak okunan sıcaklıklar $^\circ\text{C}$	Sınır-değer problemi ile hesaplanan sıcaklıklar $^\circ\text{C}$	Fark $^\circ\text{C}$
0.08	10	8.8	-1.2
0.24	13	11.5	-1.5
0.40	15	13.6	-1.4
0.80	16	16.3	+0.3

Teras döşemelerinde elektrik benzeşim metodunun kullanılması

Binanın ısı direncini değerlendirmek için elektrik benzeşim metodunu kullanmak oldukça uygundur. Bu yaklaşımla ilgili uygulamaların verildiği Türkçe yayına rastlanmamıştır. (Kreider, 1994) ve (Karplus, 1958) adlı yayınlarda ısı iletiminde elektrik benzeşim metodunun kullanılması ile ilgili genel bilgiler kapsamlı bir şekilde verilmiştir. Bu bilgiler ışığında Şekil 4 ile verilen teras döşeme kesiti örneğinin elektrik benzeşim metodu ile çözülebilmesi için, öncelikle içeriden dışarıya olan ısı akışı yolları Şekil 6 üzerinde gösterilmiştir. Isı akışı takip edilerek T_d ile T_i arasındaki elektrik devresi Şekil 7'de çizilmiştir. Dirençler ve akımlar devre üzerinde belirtilmiştir. Buna göre her bir kapalı devre kutucuğu üzerinde seçilen yönde toplam potansiyellerin sıfıra eşit olması gerektiğinden, bilinmeyen I_2 - I_5 akımları $\Delta V=I \cdot R$ kullanılarak yazılan denklemler yardımıyla bulunmuştur. Öncelikle çatıdaki ısı akışı yolu takip edilerek T_i ile T_d arasındaki sıcaklık farkını aynı noktalar arasındaki potansiyel farkı olarak düşünülünce, $20 - (-10) = I_1 \cdot 1.28$ eşitliğinden, I_1 akımı $23.44 \text{ A} (=W/m^2)$ olarak bulunur. Diğer yandan, sırasıyla tüm devre kutucukları için toplam potansiyeller sıfıra eşitlendiğinde diğer akımlarla ilgili olarak aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$0.37 i_2 - 0.17 i_3 - 0.54 i_4 = 0 \quad (33)$$

$$0.12 i_2 - 0.48 i_3 + 1.14 i_4 + 0.54 i_5 = 0 \quad (34)$$

$$0.04 i_2 - 0.04 i_3 + 0.08 i_4 - 0.62 i_5 = 0 \quad (35)$$

$$-0.53 i_2 - 0.16 i_4 + 0.04 i_5 = -30 \quad (36)$$

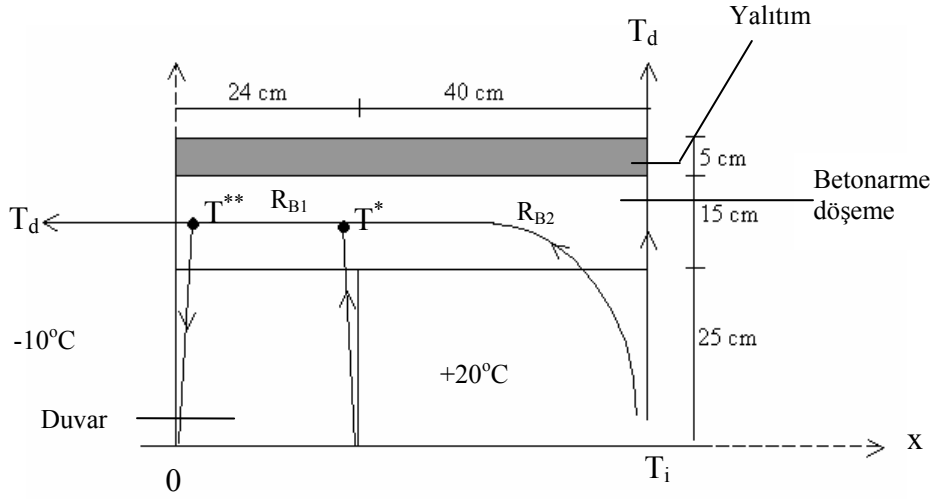
(33) ile (36) arasındaki denklemlerin çözümünden ise, aranan akımlar aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$I_2 = 51.47 \text{ A } (\equiv \text{W/m}^2), \quad I_3 = 56.53 \text{ A } (\equiv \text{W/m}^2), \\ I_4 = 17.47 \text{ A } (\equiv \text{W/m}^2), \quad I_5 = 1.93 \text{ A } (\equiv \text{W/m}^2)$$

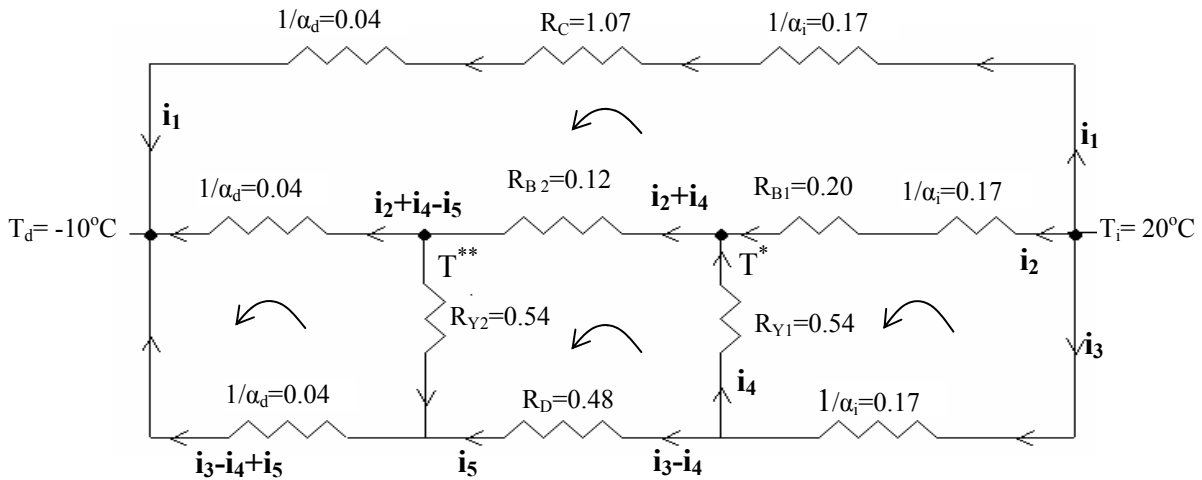
Buna göre özel olarak Şekil 7’de yeri belirtilen T^* sıcaklığı aranır:

$$20 - T^* = i_2 \cdot \left(R_{B1} + \frac{1}{\alpha_i} \right) = 51.47 \cdot 0.37 = 19^\circ\text{C}$$

ve $T^* = 1^\circ\text{C}$ olarak bulunur. Bu değer Şekil 4 üzerinde okunan sıcaklık değerinden (5°C) önemli ölçüde farklıdır. Ancak, kurulan devrenin iç ortamdaki başlangıç noktasının, duvardan ve döşemeden uzaklığı değiştirildiği zaman farklı değerler elde edileceği açıktır. Burada önemli olan bu uzaklığın doğru belirlenmesidir. Tablo 9’da farklı uzaklıklar için hesaplanan T^* ve T_{\min} değerleri, Şekil 4’te okunan değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 10’da ise farklı uzaklıklar için hesaplanan akım değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6. İncelenen kesit için ısı akışı yolları



Şekil 7. Şekil 6’daki kesit için tanımlanan elektrik devresi

R_c : Çatının ısı direnci, R_D : Duvarın ısı direnci, R_{B1} : Döşeme plâğının duvara kadar olan kısmının ısı direnci ($=0.40/2.04$), R_{B3} : Döşeme plâğının duvar üstündeki kısmının ısı direnci ($=0.24/2.04$), $R_{Y1}=R_{Y2}$: Döşeme plâğı ve duvardan oluşan yanal ısı direnci ($= (0.075/2.04)+(0.25/.50)$) dir.

Tablo 9. Elektrik benzeşim metodu ile hesaplanan değerlerin Şekil 4'te hesaplanan değerlerle karşılaştırılması

(°C)	Şekil 4'de Okunan değerler	Elektrik benzeşim metodu ile hesaplanan değerler		
		Duvardan 40 cm, Tavandan 25 cm uzakta	Duvardan 20 cm, tavandan 20 cm uzakta	Duvardan 10 cm, tavandan 10 cm uzakta
T^*	5	1	3	5
T_{min}	7	2	4	6

Tablo 10. Elektrik benzeşim metodunda farklı başlangıç noktaları için elde edilen akım değerleri

(W/m ²)	Elektrik benzeşim metodu ile hesaplanan değerler		
	Duvardan 40 cm, tavandan 25 cm uzakta başlarsa	Duvardan 20 cm, tavandan 20 cm uzakta başlarsa	Duvardan 10 cm, tavandan 10 cm uzakta başlarsa
I_1 akımı	23.44	23.44	23.44
I_2 akımı	57.47	63.63	69.55
I_3 akımı	56.53	56.32	61.36
I_4 akımı	17.47	17.29	24.35
I_5 akımı	1.93	3.22	8.13

Sonuç

Döşeme-duvar birleşimlerinde yanal kayıpların TS 825'e uygun şekilde tek boyutlu ısı iletimi denklemlerine dahil edilmesi, geç kalınmış önemli bir eksikliğin giderilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada mevcut yaklaşımların kullanılabilirliği değerlendirilerek elde edilen sonuçlar, proje kapsamında elde edilen geniş kapsamlı teorik ve deneysel çalışma sonuçları ile de birleştirilecek ve standartlarda kullanılabilir bir öneri geliştirilecektir.

TS 825'de kullanılan formüllere uygun olarak, döşemelerin oluşturduğu ısı köprülerinde yanal kayıpların ve U_l doğrusal ısı iletkenliğinin hesaplanması için, ara kat kirişli döşemelerinde uzun kanatçık modelinin, çatı katı kirişli döşemeleri için ise sınır değer problemi veya elektrik benzeşim metodunun sonuçlarının kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Ara kat döşemelerinde, uzun kanatçık modelinin kullanılması halinde, döşeme üzerinde yalıtım olsa bile, hesaplarda yalnız döşemenin ısı iletkenliğinin kullanılması daha doğru sonuçlar vermektedir. Özellikle, döşeme duvar arakesitine yakın mesafelerde iç yüzey sıcaklığı ölçüm değerlerine çok yaklaşmaktadır. Sapma 0.3°C'dir. Duvardan 0.25 m uzaklaşıldığında fark 2°C'a çıkmaktadır. Ara kat döşemelerinde yalıtım kullanılmaması durumunda (ülkemizde uygulanan durum), uzun kanatçık modelinin kullanılması ile elde edilen sonuçlar, sonlu farklar metodu kullanarak hesap yapan (QuickField 5.0) programı ile elde edilen iç yüzey sıcaklık değerlerine çok yakındır. Ancak bu durumda en büyük fark, döşeme duvar arakesitine yakın bölgede meydana gelmekte; duvardan uzaklaştıkça azalmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalar, döşemenin U-değeri ile ilgili hesaplarda kullanılacak izafi döşeme kalınlığının, yalıtımsız ve içerden yalıtımlı durumda kiriş kalınlığından daha küçük bir değer olması gerektiğini göstermiştir. Dışardan yalıtımlı durumda ise, hesaplarda, döşemenin ısı direnci içinde dikkate alınmaması gerektiği dikkati çekmektedir. Ara kat döşemelerinde yanal ısı kayıplarının ve doğrusal ısı geçirgenliğinin hesabında, TS 8441'de duvar-kolon birleşimleri için tanımlanan formüllerin saat yönünün ters yönünde 90° döndürülmesi ile kullanılmasının, yalıtımsız ve içerden yalıtımlı durumlarda, iyileştirilmek kaydıyla mümkün olabileceği ama dışarıdan yalıtımlı durumlarda kullanılamayacağı belirlenmiştir.

Teras döşemelerinde, ısı köprülerinin sınır-değer problemi haline getirilmesi, kısmi diferansiyel denklemin bilinmeyen iki farklı fonksiyonun toplamı olarak düşünülmesi ve sınır koşullarının da problemlerin birinde homojen olarak ayarlanması gerekmektedir. Bu durumda ölçüm

(veya sonlu farklar metodu ile hesap) değerlerine göre en büyük fark -1.5°C olarak bulunmuştur. Ancak bu yaklaşımın basit olarak kullanılabilmesi için çok sayıda denenmesi ve farklı yalıtım uygulamaları için tablo veya abaklar haline getirilmesi gerekmektedir. Teras döşemelerinde elektrik benzeşim metodunun kullanılması daha basit bir yaklaşım olmaktadır. Ancak bu durumda, kurulacak elektrik benzeşim devresinin iç ortamda başlatılacağı noktanın (duvardan ve tavadan uzaklığının), farklı yalıtım uygulamaları ve duvar malzemesinin özelliklerine göre önceden tanımlanması gerekmektedir. Dolayısıyla detaylı bir ön çalışmaya ihtiyaç vardır. Devrenin uygun seçilmesi durumunda hata 1°C içinde kalmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma İÇTAG I242 nolu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Al-Sanea, A. S. (2003). Finite volume thermal analysis of building roofs under two-dimensional periodic conditions, *Building and Environment* 38, 1039-1049.
- Déque, F., Olliver, F. ve Roux, J.J., (2001). Effect of 2D modelling of thermal bridges on the energy performance of buildings Numerical application on the Matisse apartment", *Energy and Buildings* 33, 583-587.
- Hassid, S., (1989). Thermal bridges in homogeneous walls: A simplified approach^{*1}, *Building and Environment*, 24, 259-264.

- Hassid, S., (1990). Thermal bridges across multilayer walls: An integral approach, *Building and Environment*, 25, 143-150.
- Kakaç, S. (1998). Isı transferine Giriş-I Isı İletimi, Tıp Teknik Yayınları, Ankara.
- Karplus, W.J. (1958). Analog Simulation Solution of Field Problems, Mac Graw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Kosny, J. ve Christian, J.E., (1995). Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls, *Energy and Buildings*, 22, 157-163.
- Kreider, J.F. (1994). Heating and cooling of buildings, design for efficiency, Mc-Graw Hill, International Editions Mechanical Engineering Series.
- Mao, G. ve Johannesson, G., (1997). Dynamic calculation of thermal bridges, *Energy and Buildings*, 26 233-240.
- Salgon, J.J. ve Neveu, A., (1987). Application of modal analysis to modelling of thermal bridges in buildings, *Energy and Buildings*, 10, 109-120.
- TS 825 (1998) Binalarda ısı yalıtım kuralları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS 8441 (1990) Isı Yalıtımı hesaplama metodları-düzlem yapı yüzeylerinde dikdörtgen kesitli ısı köprüleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TÜBİTAK-İÇTAG I242 (2005) Döşemelerde yanal ısı kayıplarının hesaplanması için parametrelerin belirlenmesi (Proje sonuç raporu), TÜBİTAK, Ankara.
- Tyn Myint-U, (1980). Partial differential equations of mathematical physics, Elsevier North Holland, New York.
- Yücesoy, L., (1990) Tercüme (Yayınlanmamış eserinden faydalanılmıştır), İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.